

УДК 551.4.03

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ HARMONICAL ANALYSIS OF TOPOGRAPHIC PROFILES

Харченко Сергей Владимирович

Kharchenko Sergey Vladimirovich

г. Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Kazan, Kazan (Volga region) Federal University

har4enkkoff@rambler.ru

Аннотация: В работе показаны особенности применения метода быстрого преобразования Фурье в приложении к анализу топографических профилей. Делается акцент на первичной морфометрической интерпретации полученных спектров амплитуды. Предлагается способ численной оценки степени аппроксимации реального профиля волновой функцией.

Abstract: The use of fast Fourier transformation method in the application to topographic profiles analysis is described. The article focused on the interpreting of resultant magnitude's spectrums. The method of quantitative assessment of real terrain's approximation quality is given.

Ключевые слова: рельеф, БПФ, топографический профиль

Key words: topography, FFT, topographic profile

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-17-10008).

Применения гармонического анализа (ГА) при изучении рельефа Земли разнообразны. ГА удобен для выявления характера временной цикличности – будь то отметки высот в точке с фиксированным плановым и меняющимся высотным положением или интенсивность отдельных рельефообразующих процессов. Однако, не менее интересен и полезен, думается, ГА колебаний по пространственным переменным. При приложении к топографическим профилям этот метод позволяет определить пространственную частоту (раз на единицу длины) и значимость (амплитуду) отдельных гармоник, в сумме своей описывающих реально существующую форму земной поверхности.

Одной из первых работ, посвященных приложению ГА для решения геолого-геоморфологических задач, стала статья А.Н. Ласточкина и И.А. Одесского [1]. В ней авторы на примере Западно-Сибирской равнины показали возможности выявления волнообразных рельефообразующих деформаций земной коры. Пять лет спустя вышла работа R.J. Pike и W.J. Rozema [2], где приводятся результаты анализа топографических профилей, «снятых» с карт масштаба 1: 24 000. Авторы выбрали 5 участков, находящихся в отличающихся ландшафтно-климатических и геолого-геоморфологических условиях. По итогам анализа они пришли к выводу, что результаты спектрального разложения профилей полезны при решении задачи классификации рельефа и районирования территории по геоморфологическим признакам. Однако, спектральные характеристики, по мнению Pike и Rozema, не заменяют, но дополняют классические морфометрические показатели. По-видимому, выявление в рельефе волнообразных структур разной частоты и амплитуды может свидетельствовать о пространственной периодичности и относительной значимости факторов, приводящих к образованию этих периодических структур.

По теме ГА при изучении рельефа вообще и его гипсометрии, в частности, опубликованы десятки трудов, но по причине лимитированного объема этой статьи более подробный обзор разработанности проблемы оставим читателю.

В настоящей статье дадим пример сравнительного ГА рельефа трех участков суши, характеризующихся неодинаковой морфологией земной поверхности. Нами использовался

метод быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT). Источник данных о топографии – SRTM 1". Выборки высот из файлов SRTM производились только вдоль параллелей или меридианов (т.е. отдельные строки и столбцы при матричном представлении ЦМР). Хотя, скажем, при установлении периода колебаний (расстояния между горными хребтами, водораздельными грядами на равнинах, между тальвегами субпараллельно ориентированной эрозионно-русовой сети), корректнее делать выборку высот перпендикулярно направлению простираения «волн» (секущие по отношению к «волнам» профили).

В результате БПФ отметок высот земной поверхности по линии профиля получаем дискретные частотные спектры амплитуд колебаний показателя абсолютной высоты и их фазового сдвига. Каждая n -я гармоника на этом спектре имеет период, равный $1/n$, т.е. первая гармоника будет представлена только одной волной, вторая – двумя и т.д. Это, в какой-то мере, ограничивает возможности ГА рельефа по недостаточно протяженным профилям.

На рисунке 1 показаны некоторые результаты ГА широтного профиля №1 длиной 63,3 км, вытянутого вдоль южного макросклона Гималайского хребта. Географические координаты начала и конца профиля, соответственно, $27^{\circ}36'$ с.ш., 91° в.д. и $27^{\circ}36'$ с.ш., $91^{\circ}34'$ в.д. Помимо исходной формы профиля и восстановленной формы (по первым 10 из 1024 гармоник, т.е. менее 1% от их общего числа), на схеме отображены графики 1, 2 и 3 гармоник, имеющих частоты, соответственно, 1, 2 и 3 «волны»/профиль. Схема наглядно демонстрирует, что колебания с величиной периода, равной длине профиля, не являются здесь ведущими в создании имеющейся топографии местности.

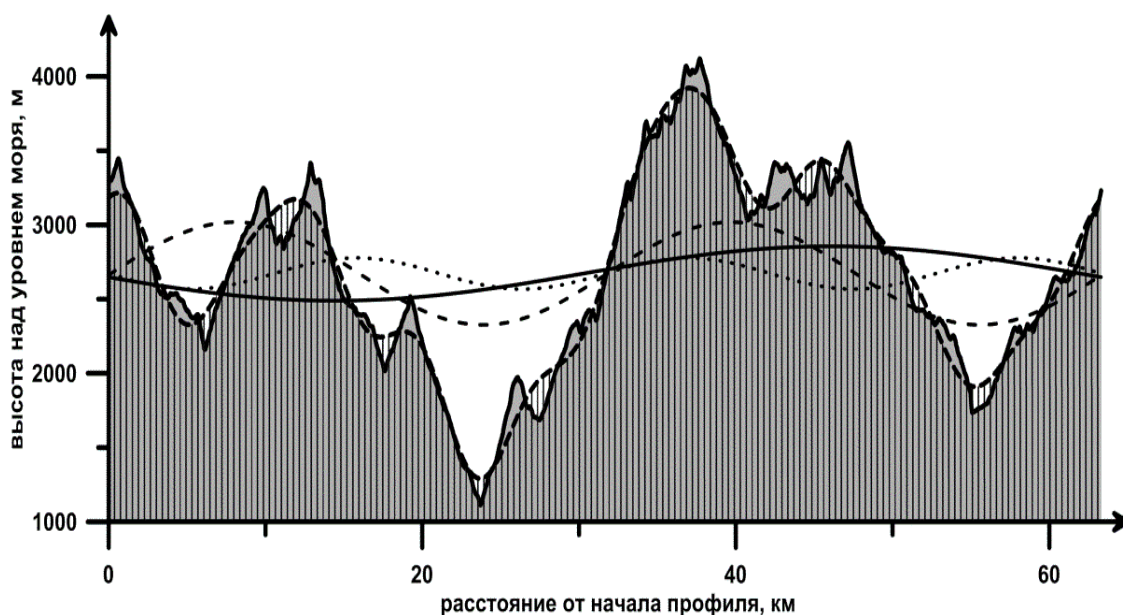


Рисунок 1. Топографический профиль №1 показан жирной сплошной линией с серой заливкой. Первая, вторая и третья гармоники – обыкновенными сплошной линией, длинным и коротким пунктирами, соответственно. Восстановленный по первым 10 гармоникам профиль – жирным пунтиром с вертикальной штриховкой

Рассмотрим параметры первых десяти гармоник. Визуальная оценка сравнительной «значимости» их по схеме подтверждается в таблице 1. Наибольший вклад в дифференциацию высот на участке (а именно, ± 346 м) вносят колебания с частотой $2/63,3$ км – это 2-я гармоника. Уступает по «значимости» ей 1-я гармоника, которая характеризуется амплитудой ± 183 м. Дальше, по возрастанию порядкового номера также не происходит монотонного убывания «значимости» (влияния на итоговую форму профиля) / амплитуды рассматриваемых периодических составляющих. Хотя общий тренд, конечно, – на убывание.

Таблица 1. Параметры первых десяти гармоник по результатам быстрого преобразования Фурье топографического профиля №1

Номер п/п	Период, км	Амплитуда, м	Фаза, °	Номер п/п	Период, км	Амплитуда, м	Фаза, °
1	63,3	183,3	97,8	6	10,5	17,2	-6,2
2	31,6	346,0	-91,6	7	9,0	74,1	-34,9
3	21,1	104,9	90,2	8	7,9	30,3	-176
4	15,8	124,9	-8,7	9	7,0	10,8	12,3
5	12,7	112,2	43,2	10	6,3	45,7	-55,3

Помимо возможности выявления «скрытой», неявной регулярности в рельефе, гармоническое разложение часто используется как формализованный инструмент сглаживания топографических данных. Достаточно использовать сумму первых N гармоник для получения линии профиля, аппроксимирующей исходный реальный профиль с интересующей нас степенью «похожести». Пусть, как критерий «похожести» можно взять отношение сумм 1) модулей разностей величин реальной и симитированной высот для каждой точки профиля с координатой x_i ; 2) модулей разностей величин реальной высоты для каждой точки профиля с координатой x_i и их среднего значения. Величина этого параметра, равная «1», будет соответствовать «похожести» всего профиля со сколь угодно расчлененным рельефом прямой горизонтальной линии с отметкой высот, равной среднему значения высоты на нем. Напротив, величина параметра «0» будет означать, что восстановленный профиль во всех деталях описывает исходную линию. Для установления логического, интуитивного соответствия значений их смыслу (т.е. «0» – min степень аппроксимации, «1» – max степень) вычтем получаемое отношение из «единицы». В виде уравнения это можно записать так:

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |H^r(x_i) - H^h(x_i)|}{\sum_{i=1}^n |H^r(x_i) - ((\sum_{i=1}^n H^r(x_i))/n)|}$$

где S – степень подобия, от «similarity»,

$H^r(x_i)$ – реальная (r) высота точки с координатой на профиле x_i ,

$H^h(x_i)$ – симитированная, «гармоническая» (h) высота точки с координатой на профиле x_i ,

n – количество точек профиля.

По сути, данный параметр показывает долю суммарного отклонения реальных высот от их средних значений, которую можно описать (и объяснить) первыми N гармониками. Естественно, что эту характеристику нельзя равнять с субъективной оценкой визуального подобия графиков. Для профиля №1 на первые 10 гармоник из 1024 приходится немногим менее половины суммарного отклонения реальных высот от их средних значений (табл.2). Учитывая, что параметры гармоник, получаемых методом БПФ, распределены симметрично (т.е. первая гармоника идентична последней, вторая – предпоследней и т.д.), влияние периодических составляющих (в отличие от постоянной части) на формирование реальной линии профиля следует оценивать с весом 2^* .

Таблица 2. Доли суммарных отклонений реальных высот по профилю №1 от их среднего значения, объясняемые колебаниями с параметрами суммы первых N гармоник

	Первые N гармоник									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
невзвешенная сумма	0,07	0,35	0,36	0,41	0,46	0,47	0,48	0,48	0,48	0,49
взвешенная (2^*) сумма	0,10	0,51	0,56	0,64	0,73	0,73	0,78	0,80	0,80	0,82

Рассмотрим профиль №2 этой же длины, проложенный в совершенно иных географических условиях, а именно – на Восточно-Европейской равнине, на западном макросклоне Среднерусской возвышенности (территория Курской области). Этот профиль в средней своей части пересекает р. Сейм, а также один его правый относительно крупный приток, и ряд левых более мелких притоков первого и второго порядков (в классической системе нумерации порядка притоков). Координаты начала и конца профиля, соответственно, (51°55' с.ш., 35°28' в.д.) и (51°21' с.ш., 35°28' в.д.).

На профиле хорошо различимы долины этих водотоков, например, широкая асимметричная долина р. Сейм. Понижения в рельефе (долины рек разной водности и положения в иерархии речной системы, верховья крупных балок, овраги) на профиле выражены большим диапазоном «ширин» (рис.2.).

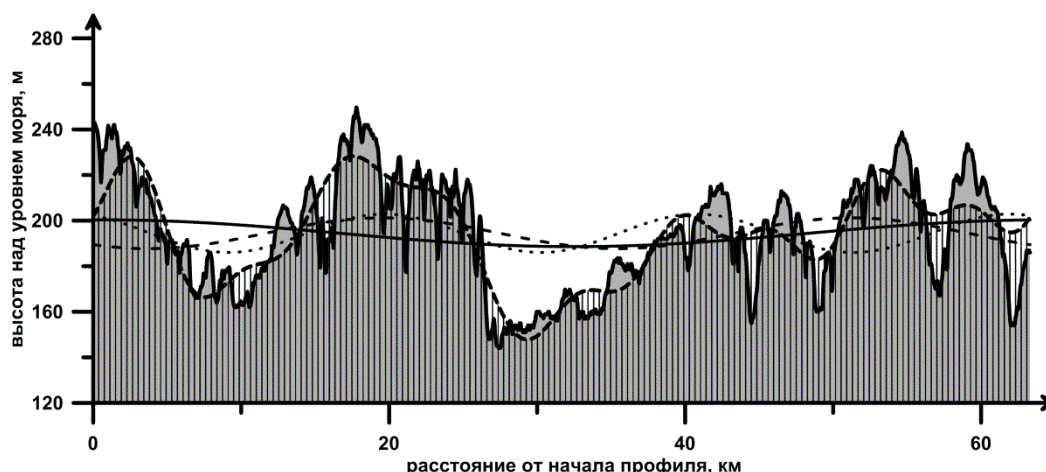


Рисунок 2. Топографический профиль №2 показан жирной сплошной линией с серой заливкой. Первая, вторая и третья гармоники – обыкновенными сплошной линией, длинным и коротким пунктирами, соответственно. Восстановленный по первым 10 гармоникам профиль – жирным пунтиром с вертикальной штриховкой

Несмотря на резко меньшую, относительно профиля №1, общую расчлененность рельефа, густота расчленения по тем же данным (SRTM 1") для профиля №2 значительно больше. Об этом свидетельствует хотя бы тот факт, что на протяжении профиля №1 при движении от его начала к концу происходит 178 смен знака продольного уклона, т.е. пересекается 178 различных на ЦМР линий водоразделов и тальвегов. В случае профиля №2 происходит уже 340 смен знака продольного уклона при той же длине линии в плане. Это позволяет считать, что для более или менее точного описания реальной поверхности восстановленной линией профиля №2 требуется использовать гармоники в целом более высоких частот, чем в случае профиля №1. По таблице 3 легко заметить, что «стандартный» набор первых десяти гармоник дает для профиля №2 значительно меньшую степень подобию.

Таблица 3. Доли суммарных отклонений реальных высот по профилю №2 от их среднего значения, объясняемые колебаниями с параметрами суммы первых N гармоник

	Первые N гармоник									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
невзвешенная сумма	0,03	0,11	0,23	0,25	0,27	0,29	0,29	0,29	0,31	0,32
взвешенная (2*) сумма	0,06	0,15	0,35	0,41	0,43	0,46	0,46	0,46	0,48	0,49

Аппроксимация методом БПФ топографического профиля, пересекающего участки с совершенно разным характером (глубиной и густотой) расчленения, может быть не столь удачна, как аппроксимация его отдельных частей, отделенных друг от друга по границе

типов рельефа. Следовательно, проведение ГА по линиям гипсометрических профилей с разной длиной сегмента (2^n пикселя ЦМР, например, 2048 пикселей для профилей №1 и №2) и скользящим сдвигом может позволить идентифицировать и формально обосновать границы участков с разным характером топографического расчленения. Для иллюстрации этого тезиса рассмотрим профиль №3 (рис.3).

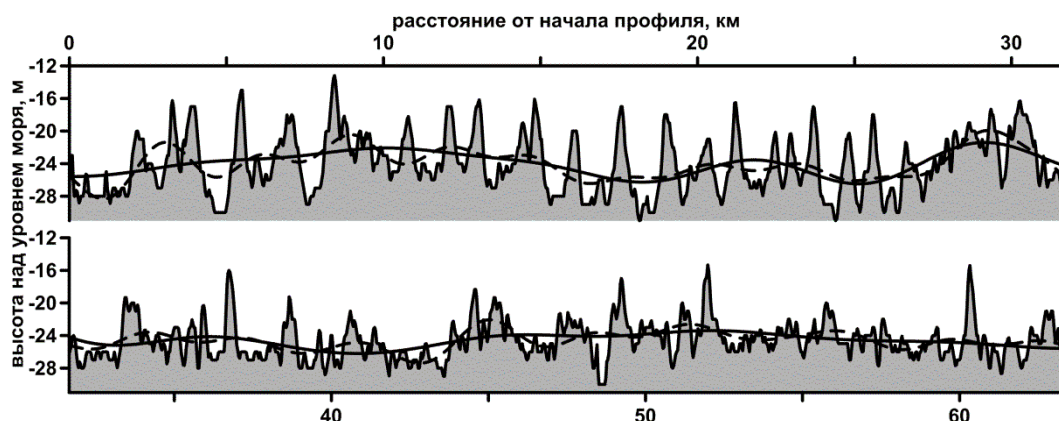


Рисунок 3. Топографический профиль №3 (северная и южная половины). Сплошной линией показан восстановленный по первым 11 гармоникам профиль при гармоническом разложении всего набора данных (63,3 км). Пунктирами показаны восстановленные по первым 10 гармоникам профили отдельно для северной и южной частей (по 31,65 км)

Участок расположен на Прикаспийской низменности, у западной окраины дельты р. Волги. Координаты начала и конца профиля, соответственно, (46° с.ш., $47^\circ 10'$ в.д.) и ($45^\circ 26'$ с.ш., $47^\circ 10'$ в.д.). Северная половина профиля проходит по ареалу распространения ложбинно-грядового рельефа, многие из ложбин заняты озерами или «ильменями» – на профиле они отображены как понижения с плоскими днищами. Южная половина профиля характеризуется мелкогрядовым рельефом – с большей густотой, но меньшей глубиной расчленения.

Рисунок 3 позволяет произвести сравнение «качества» аппроксимации реального профиля волновыми функциями, сгенерированными по 11 гармоникам при гармоническом разложении данных всего профиля, и функциями, созданными по 10 гармоникам при обособленном разложении северной и южной части профиля. Разница в количестве взятых гармоник определена необходимостью сохранения частотного диапазона, в котором восстанавливается профиль. Частота первой гармоники при разложении половин профиля – $1/31,7$ км – соответствует частоте второй гармоники при разложении в два раза более протяженного полного профиля. Получается, что наиболее высокие показатели частот (частоты 11-й и 10-й гармоник, соответственно, для полного профиля и его половин) также совпадают. Сравнить качество аппроксимации помогает таблица 4.

Таблица 4. Доли взвешенных суммарных отклонений реальных высот по профилю №3 от их среднего значения, объясняемые колебаниями с параметрами суммы первых N гармоник

	Первые N гармоник									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
весь профиль	0,00	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
северная половина	0,01	0,04	0,05	0,08	0,10	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16
южная половина	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,10	0,12	0,13

Таким образом, ГА топографических профилей позволяет:

1. выявить периодический «сигнал» в изменениях высоты земной поверхности, определить значимость (амплитуду в метрах) для колебаний отдельных частот. Так, например, значимость гармоник в создании существующей морфологии земной поверхности убывает в рядах $\{2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 3\}$, $\{3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 11 \rightarrow 4\}$, $\{3 \rightarrow 12 \rightarrow 29 \rightarrow 36 \rightarrow 42\}$ для профилей №1, 2 и 3, соответственно;
2. оценить, колебания каких частот наилучшим образом описывают реальный профиль, и определить относительную важность факторов, обуславливающих колебания отметок высот в тех или иных частотах. В рассмотренных нами примерах оказалось, что первыми по порядку гармониками хорошо описывается горный альпийский рельеф, несколько хуже – эрозионно-денудационный крупноувалистый, еще хуже – низменный ложбинно-грядовый (при фиксированном разрешении исходных данных);
3. формально обосновать проведение границ участков местности с разным характером расчленения.

Список литературы:

- [1] Ласточкин А. Н., Одесский И. А. Гармонический анализ гипсометрических профилей с целью выявления волнообразных деформаций // Геоморфология. – 1970. – №2. – С. 78–88.
- [2] Rike R. J., Rozema W. J. Spectral analysis of landforms // Annals of the Association of American Geographers. – 1975. – Vol.65 (December), N.4. – Pp. 499–516.

УДК 551.89

ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ГОЛОЦЕНА О.БОЛЬШЕВИК: НОВЫЕ ДАННЫЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

HOLOCENE PALEOGEOGRAPHY OF BOLSHEVIK ISLAND: NEW DATA AND PRELIMINARY RESULTS

Черезова Анна Алексеевна, Федоров Григорий Борисович, Ежиков Илья Сергеевич
Cherezova Anna Alexeevna, Fedorov Grigory Borisovich, Yozhikov Iliya Sergeevich
г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт
Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University,
Saint-Petersburg, Arctic and Antarctic Research Institute
a.a.cherezova@gmail.com

Аннотация: В данной статье рассматриваются первые результаты исследования 246 см колонки донных отложений оз.Твердое, отобранной в ходе полевых работ в 2015 году на о.Большевик (Северная Земля). На основе имеющихся на данный момент результатов литолого-фациального и гранулометрического анализов, можно с высокой долей уверенности говорить, что данная колонка охватывает период осадконакопления всего голоцена. Это позволит после проведения ряда анализов (спорово-пыльцевой, диатомовый, геохимический) провести детальную реконструкцию развития природной среды и климата в голоцене для данного ключевого района исследований российской Арктики.

Abstract: This article discusses the first study results of 246 cm of Tverdoe Lake sediment core, which was obtained through field work in 2015 year on Bolshevik Island (Severnaya Zemlya). On the basis of currently available results of lithofacies analysis and particle size analysis, we can